

Le développement durable dans la construction des bâtiments

**L'économie circulaire dans l'industrie des matériaux de construction
Association suisse de l'industrie des graviers et du béton (ASGB)**

31.03.2023, Jongny

Dr Denis Clément, Professeur associé HES
denis.clement@hesge.ch

Institut du paysage, d'architecture, de la construction et du territoire (InPact) – Matériaux et Structures (MxS)

www.hesge.ch/hepia/rad/inpact

www.hesge.ch/hepia/groupe/materiaux-structures

www.hesge.ch/hepia/laboratoire/laboratoire-dessais-des-materiaux-et-structures

Le développement durable dans la construction des bâtiments

en relation avec l'industrie des graviers, des terres d'excavation et du béton

- Le défi
- La durée de vie des bâtiments
- La conception architecturale, technique et structurelle des bâtiments
- La rénovation des bâtiments
- L'utilisation efficiente du béton
- La consommation d'énergie et le rejet de CO₂
- Evolution des ciments et produits de substitution pour diminuer le clinker
- Diverses ressources, le recyclage et le réemploi

Défi majeur pour le secteur de la construction

En considérant le cycle de vie du bâtiment

- la préservation des ressources naturelles (terre, sable, gravier, métaux,...)
(en considérant que les surfaces constructibles sont limitées)
- la réduction des déchets
- la réduction des émissions → des gaz à effet de serre (politique climatique)
- la réduction de la consommation d'énergie → grise → non-renouvelable (politique énergétique)

tout en conservant

- la fiabilité
- la durabilité
- l'innocuité
- son attractivité (économique & ouvrabilité & disponibilité)

«Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs»

Source : fr.wikipedia.org

«All appropriate measures ... shall be taken ... to ensure that they¹ not be sacrificed for present expediencies and conveniences»

A BILL OF RIGHTS FOR FUTURE GENERATIONS , THE COUSTEAU SOCIETY

¹future generations

Le bâtiment qui répond au mieux à ce défi ?

du point de vue de la structure porteuse

... est celui qui existe déjà !

270 Park Avenue (1960–2021)

Source : <https://en.wikipedia.org/>



La Tour Union Carbide (215 m), à New York, sera l'édifice le plus élevé à être démoli. GETTY IMAGES

Source : Tribune de Genève août 2018

... pourquoi ?

La démolition et le remplacement des structures sont souvent motivés par l'obsolescence et des facteurs économiques plutôt que par des motifs structurels

Source : epfl.ch/labs/construct

... quelle est la durée de vie d'un bâtiment ?

100, 350 ou 500 ans?

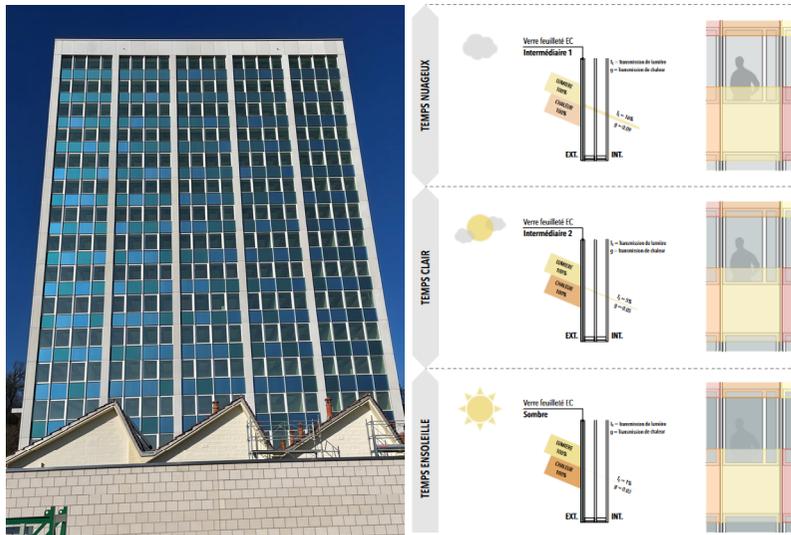
Le cairn de Barnenez 4850 avant J.-C.
Les pyramides d'Égypte 2100 avant J.-C.



Source : fr.wikipedia.org

Maison Tavel (reconstruite après l'incendie de 1334) et modifiée au XVIIe siècle et au XVIIIe siècle

Qualité architecturale - Transformation – Réemploi



Rénovation (2021-2023) : THPE de Ancienne tour Firmenich (1964) et 2 autres bâtiments

Situation : Pointe Nord du secteur PAV, Genève

Façade : 1'000 m² de panneaux photovoltaïques et vitrages électrochromes.

Sera chauffée et rafraîchie via le réseau Génilac.

Est ventilée mécaniquement et naturellement.

Usage de matériaux naturels et réemploi ou recyclage de plusieurs composants et matériaux.

Peu d'intervention sur la structure porteuse.

Maître d'ouvrage : CPEG, Caisse de Pension de l'Etat de Genève

Source : www.ge.sia.ch



Source : Conceptual Design of Structure 2021
Dr. Neven Kostic with TEN Architects

Construire les structures en béton armé pour 500 ans ?

Structures résilientes !

Adaptées pour les utilisations futures !

Bâtiment face à l'épreuve du temps

Obsolescence des techniques des bâtiments et vieillissement des façades

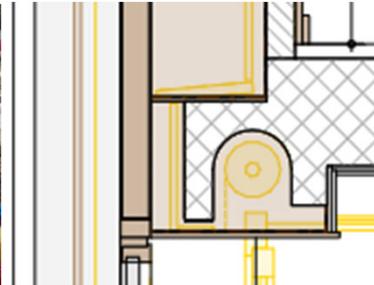
Paradoxalement l'évolution constante des réglementations / normes (dont la plupart en faveur de l'environnement), rendent les immeubles encore plus rapidement obsolètes...

Prévoir la réversibilité

- Eviter de «noyer» les techniques dans la structure
- Concevoir une structure facilitant les rénovations futures
- Dangers naturels
- ...



Source : Basys.ch

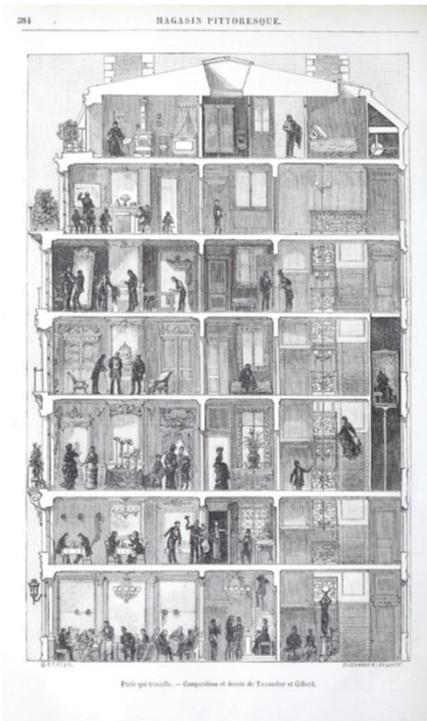


Firmenich GE, plan sur sia.ge.ch

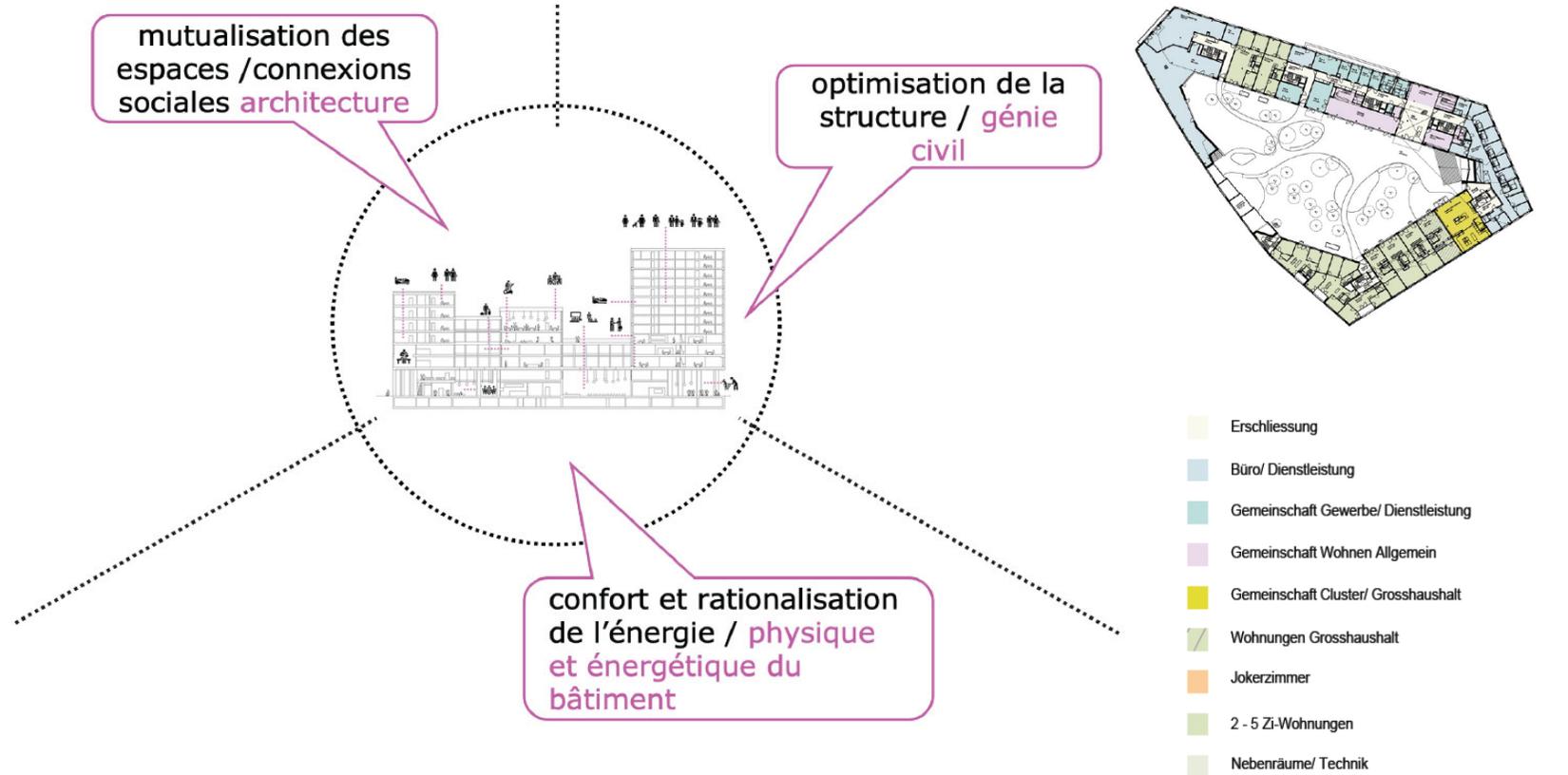


Photo D.Clément

Bâtiments multifonctionnels



Source : «Paris qui travaille»
Coupe d'immeuble parisien
Gravure de Grenier
d'après Tissandier et Gilbert
parue dans Le Magasin pittoresque
1883, pp. 384 et 385.



Source : BATIMENTS MULTIFONCTIONNELS A GENEVE
Guide pour le maître de l'ouvrage
Paola Tosolini, Denis Clément, Ricardo Lima (HEPIA) et Sabine Emad (HEG)

Die Kalkbreite – ein neues Stück Stadt, Projektdokumentation 2014
Genossenschaft Kalkbreite

Béton mal utilisé ? Une fatalité ?





TRIBUNE
Séisme en Turquie : le béton en question

Séismes en Turquie et en Syrie dossier ▾

Et si la catastrophe «naturelle» survenue il y a un mois en Turquie ne l'était pas tant que ça ? Le philosophe Anselm Jappe pointe du doigt le rôle amplificateur dans la destruction jouée par le béton, matériau qui n'est pas mauvais en soi mais a une «tendance fatale à être mal utilisé».



31.03.2023

24 heures | Mercredi 14 septembre 2022

Immobilier 11


Les pros ont la parole

On a du béton, mais plus trop d'idées

Lionel Rinquet
 Architecte
 EPF SIA,
 professeur associé
 à l'Hepia



I fut un temps où j'étais plus jeune et où il était d'usage de dire que chez nous, on n'a pas de pétrole, mais on a des idées!

Question matières premières, nous n'avions certes pas de puits de pétrole en Suisse, mais nous avions déjà beaucoup de béton, matériau extraordinaire lorsqu'il est utilisé à bon escient, au service des grandes (et moins grandes) idées de leur temps: réduit national, grands barrages, viaducs autoroutiers, cités nouvelles, zones villas, etc.

Aujourd'hui, on continue à couler beaucoup de béton, mais quid des idées?

Ce printemps, la section vaudoise de la Société des ingénieurs et architectes (SIA) a monté une exposition sur le thème de plus en plus actuel



L'usage du béton répond-il toujours à une nécessité? On peut en douter... GETTY IMAGES

Ciment spécial CEM III/B : rétablir la vérité sur ses usages

Y.Schiegg & W.Matthes
 Source espazium.ch/fr 02.02.2023



Pourquoi le béton ?

point de vue du laboratoire CONSTRUCT de l'EPFL

irremplaçable pour certaines utilisations

... à ce jour, il n'existe pas de moyen simple de remplacer notre utilisation du béton par quelque chose de plus écologique...

selon l'objet et la méthode de calculs

... de par sa résistance et son utilité, le béton armé est moins énergivore que la plupart des autres alternatives...

... les matières premières nécessaires à la fabrication du béton peuvent être obtenues à moindre coût partout dans le monde*... *un produit local*

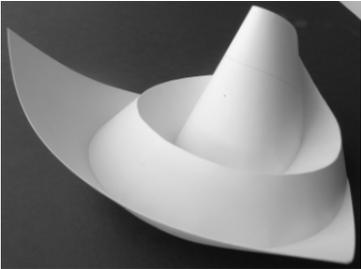
... une diminution globale de l'utilisation du béton n'est dès lors pas prévue dans un proche avenir...

Mais : ... l'omniprésence du béton armé implique ...

l'amélioration de l'efficacité dans son utilisation !

des alternatives au ciment Portland ... pour réduire les émissions de CO₂ !

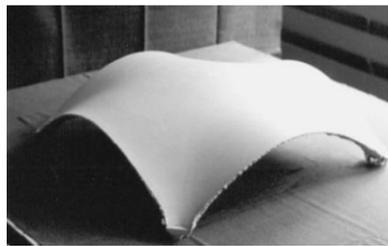
Utilisation efficace du béton



Josef Albers , atelier sur les matériaux et la construction 1923 à 1933 au Bauhaus
« faire quelque chose en respectant le matériau et en tenant compte de ses spécificités »

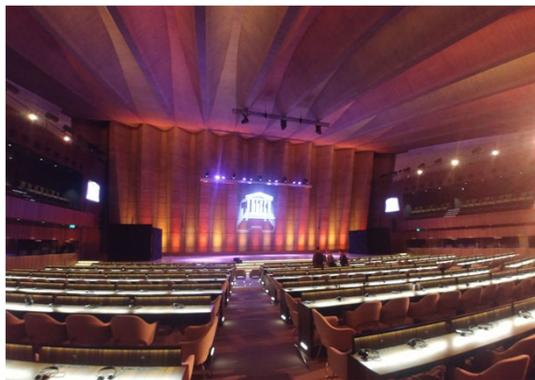
Source : Design in Papierverarbeitung, Scherpe Verlag in Krefeld 1972

« Everything in nature, whatever you find is organic shape, is double curvature, nothing plane. » « Where traditional statics ends, there the calculation of a shell starts. » Heinz Isler (tiré de Chilton J., Heinz Isler, Thomas Telford, 2000)



Heinz Isler réalise un modèle de coque appuyée sur quatre points, obtenus d'un tissu trempé dans du polyester, solidifié et retourné. Elancement possible avec des coques de béton 1/500

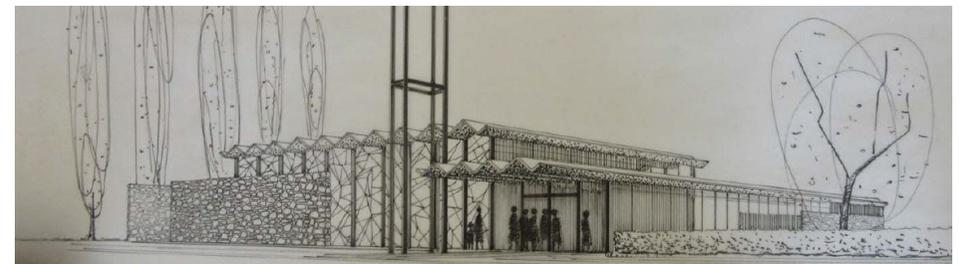
Source : TGC 5 ANALYSE DES STRUCTURES ET MILIEUX CONTINUS, François Frey



Structures plissées

Paris - Siège UNESCO, 1958
Architectes Bernard Zehrfuss et Marcel Breuer
Ingénieur : Pier Luigi Nervi

Source : fr.geneawiki.com



Temple de Châtelaine, GE
A. Gaillard

Source : Archives Pavillon Sici

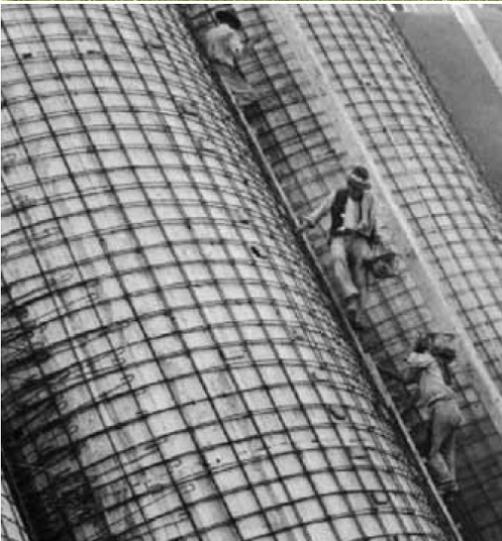
Alexandre Sarrasin & Robert Maillart

économie de matière et esthétisme



Source : ingbaukunst.ch

Barrage à voûtes multiples
des Marécottes 1926
Alexandre Sarrasin



Source : Concrete international
Mai 2009, 47; Katrin Habel &
Eugen Brühwiler

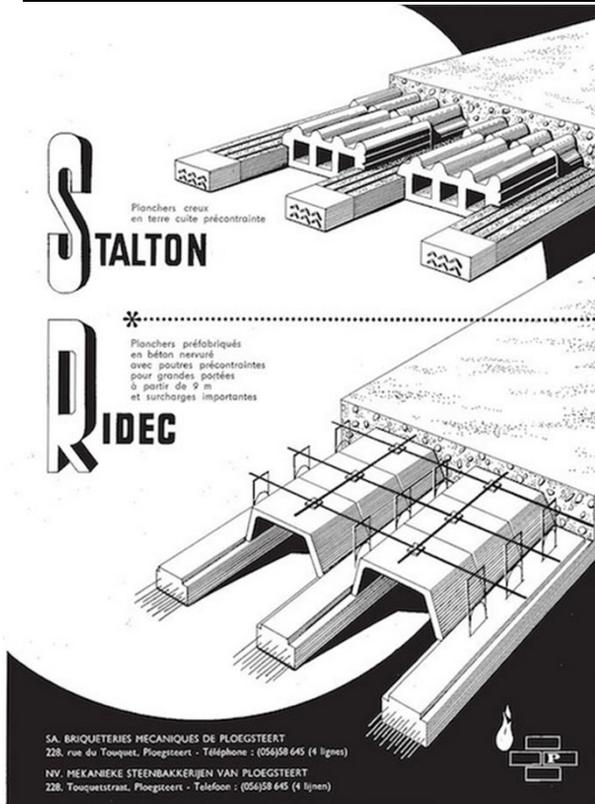


Pont de Salginatobel
(1930) R. Maillard

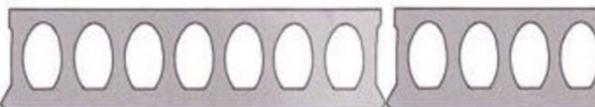
Source : fr.wikipedia.org

Inventions et évolutions

avec le souci d'économiser de la matière



Source : materiauxdeconstructiondapresguerre.be



31.03.2023

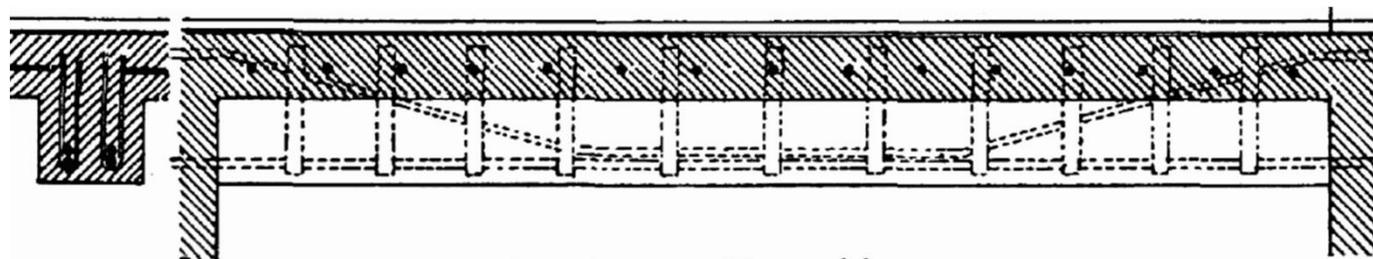


Fig. 50. System Hennebique.

Source : fr.wikipedia.org



Dalles à corps creux
Dès l'antiquité pour réduire le poids



Source : Inventaire Georges Addor, F.Graf Et. al.



Préfabrication

Dalle alvéolée et dalle TT

coffrage caissons

Dalle-champignon de Robert Maillart

et aujourd'hui

HEPIA
RA&D



Halle aux céréales
d'Aldorf

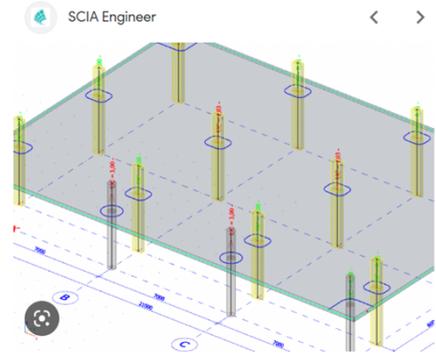
Source : fr.wikipedia.org

31.03.2023

L'économie circulaire dans l'industrie des matériaux de construction, ASGB



Source : Basvs.ch



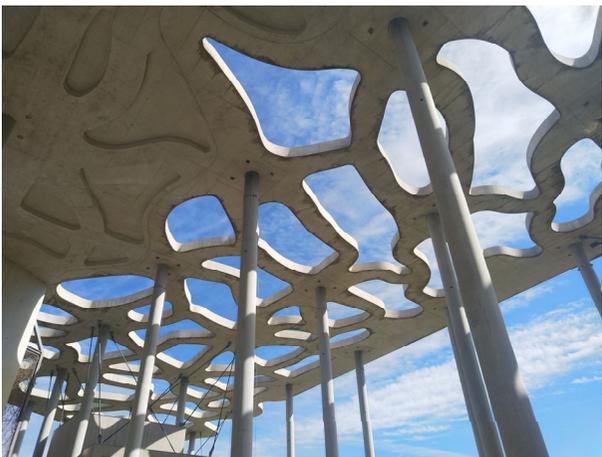
13

Utilisation efficace du béton

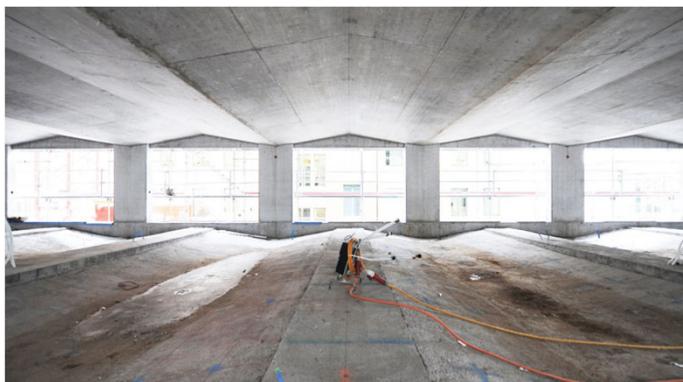
exemples récents où les ingénieurs (re)-donnent la forme et la fonctionnalité à la matière



Source : Structure en béton A.Muttoni & M.Fernández



Fondation Jan Michalski (2016), Photo D.Clément
Architectes : Vincent Mangeat et Pierre Wahlen
Conception inspiré de la répartition de l'effort
tranchant par le bureau Muttoni & Fernández



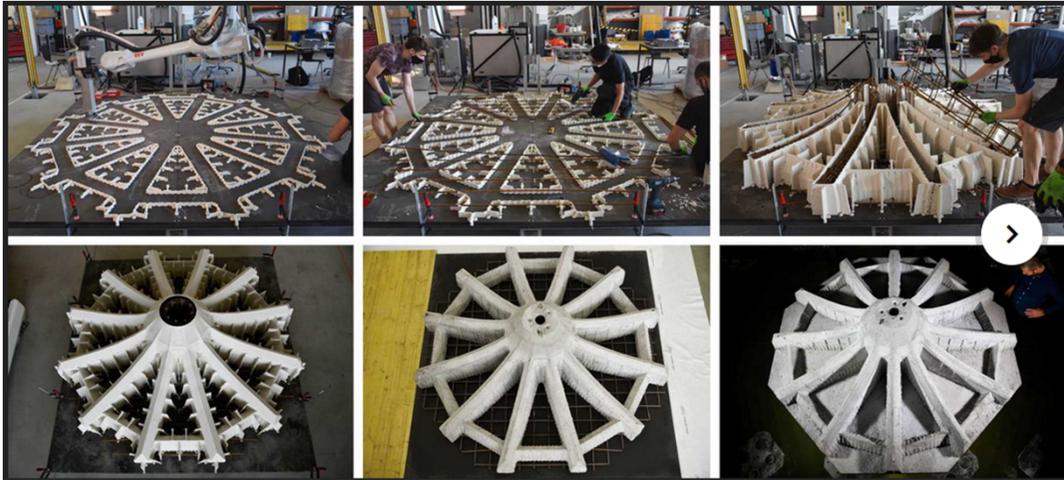
Présentation «Porter l'architecture» HEPIA 09.05.2018
Roberto Guidotti, Pedrazzini Guidotti



DFAB House Empa (2018). Gain 65% p.r. dalle pleine.
L'imprimante 3D à sable utilisée pour la fabrication du
coffrage (résolution : fraction de millimètre).
Source : empa.ch

Utilisation efficace du béton

exemples récents en développement



Source : Projet RIBB3D kaufmann.ibk.ethz.ch



«Hone Structures» applique «Generative Design» aux structures en béton armé selon des stratégies de conception (algorithme)

Source : redshift.autodesk.com/articles/sustainable-concrete

Small-scale deep-beam samples, designed with different constraints but using the same method. Courtesy of Hone Structures.

Consommation d'énergie et rejet de CO₂ : Lumière



Lampe à incandescence classique Source : fr.wikipedia.org

Consommation divisée par

12



Source : fr.wikipedia.org

Consommation divisée par ?



Source : auto.com



Source : lacentrale.fr

La consommation réelle des voitures a très peu baissée depuis 27 ans. De 1,37 litres pour les voitures à essence et 0,66 litres pour le diesel. / hykoe/Sock.adobe

En 1990, l'ensemble des voitures à essence en circulation en France consommaient en moyenne 8,68 litres aux 100 km. Et l'an dernier, cette consommation moyenne a été de 7,31 litres aux 100 km. De même, pour les véhicules diesel, la consommation réelle était de 6,73 aux 100 km en 1990. Elle a été de 6,07 l/100 en 2017.

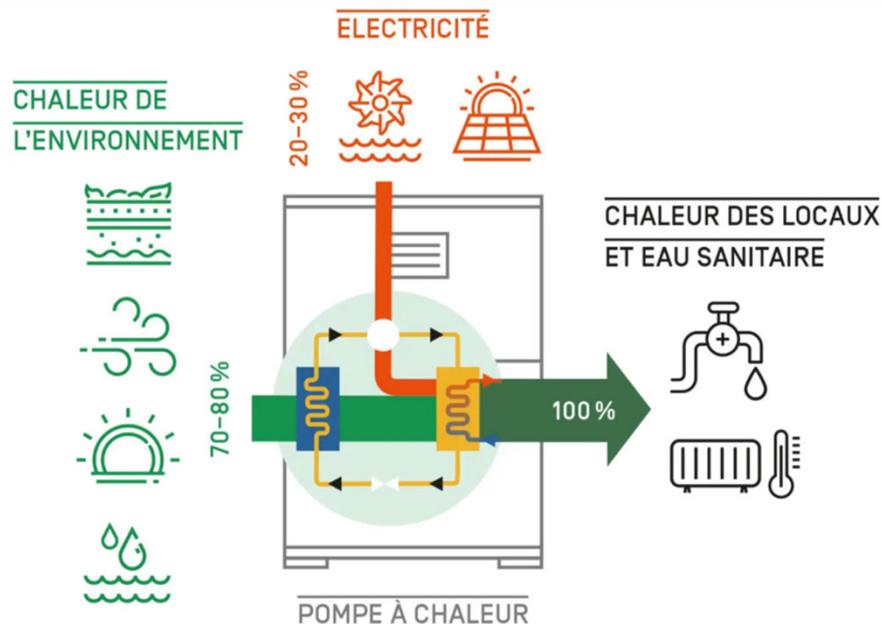
En 27 ans, la baisse de consommation des voitures en circulation en France a donc été, en moyenne, de 1,37 litre pour les voitures à essence et 0,66 litre pour les voitures diesel.

Ces chiffres surprenants sont extraits du [bilan annuel réalisé par le Comité des constructeurs français d'automobile \(CCFA\)](#). Ils contrastent avec le discours des fabricants automobiles.

Source : la-croix.com 19/09/2018

L'économie circulaire dans l'industrie des matériaux de construction, ASGB

Consommation d'énergie et rejet CO₂ : Chauffage et eau sanitaire



Les pompes à chaleurs à entraînement électrique produisent 100 % de chaleur utilisable à partir de 20 à 35 % d'électricité (énergie d'entraînement) et de 65 à 80 % de chaleur issue de l'air, de l'eau (chaleur environnante) ou du sol (chaleur géothermique).

Source : suisseenergie.ch

Les chiffres du parc immobilier suisse

- La Suisse compte environ **1,7 million** de bâtiments habitables.
- Quasiment quatre bâtiments sur cinq ont été construits **avant 1990** (dans la moyenne européenne)
- **Plus d'un million de maisons** sont mal ou ne sont pas du tout isolées.
- Presque **deux bâtiments sur trois** sont chauffés au mazout ou au gaz (méthane)
- En 2018, **7500 bâtiments** ont été isolés et 3000 systèmes de chauffage remplacés.
- Le **taux de rénovation des biens immobiliers est d'environ 1% par année.**

Source: Programme Bâtiments, Credit Suisse

Energie électrique



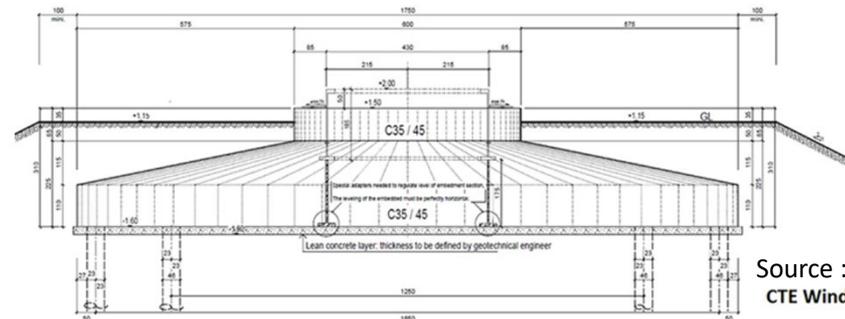
8%



61%



Fondation pour une éolienne



Source : sunballast.it



29%

Source : ensi.ch

Réduire la dépendance de la Suisse au charbon au XX^e siècle

- Electrification précoce des chemins de fer
- Développement de l'énergie à partir des ressources nationales
- Développement d'une industrie électromécanique ... **du génie civil ... et du béton**
- Impulsion à l'électrification générale du pays



Source : la-gruyere.ch



Source :grande-dixence.ch

Energie et rejet CO₂ pour la fabrication du ciment (clinker)

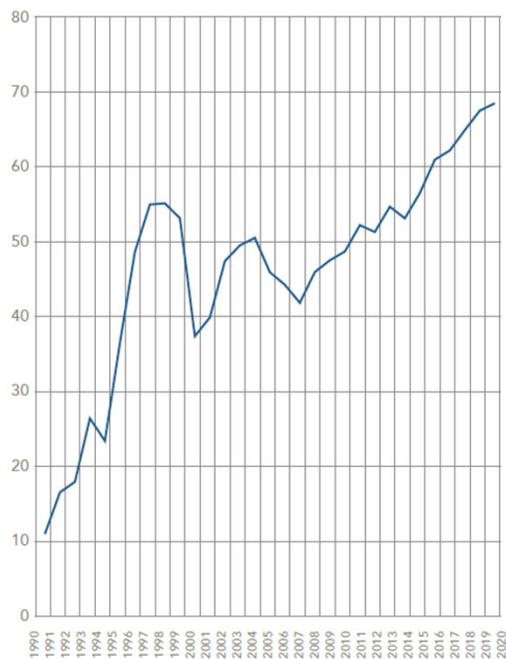
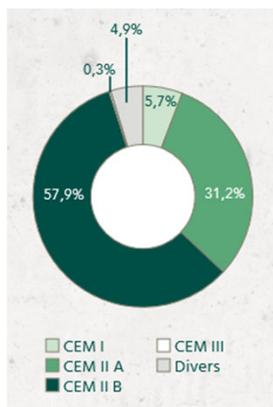


Source : CemSuisse2021 (Chiffres de 2020)

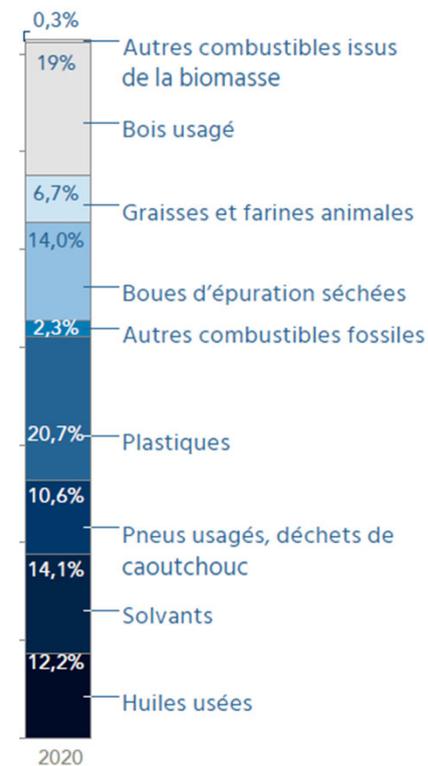
570kg de CO₂ par tonne de ciment

Taux de substitution

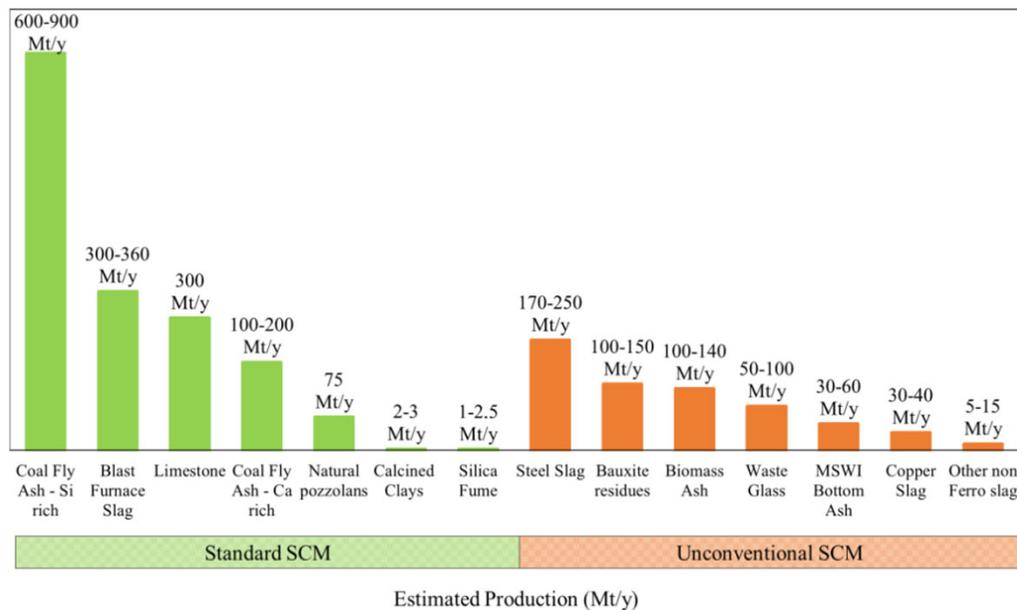
Taux de substitution énergétique par les combustibles de substitution, en %



357 113 t Total des combustibles

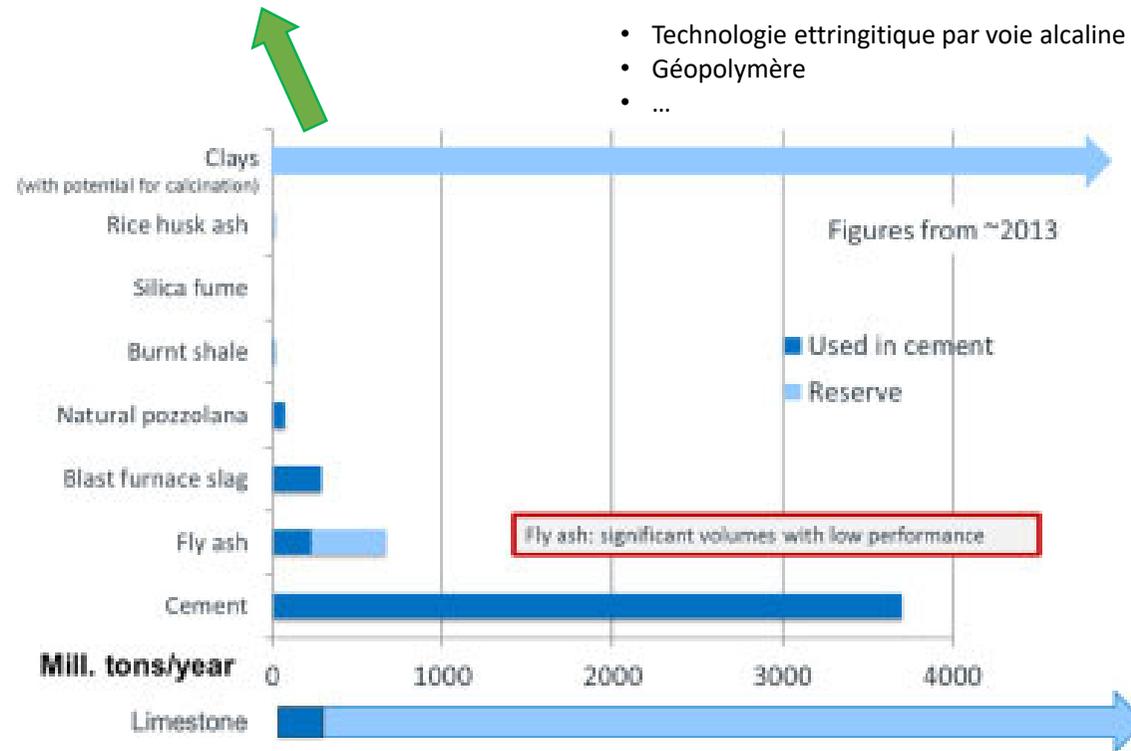


Produits de substitution pour diminuer le clinker



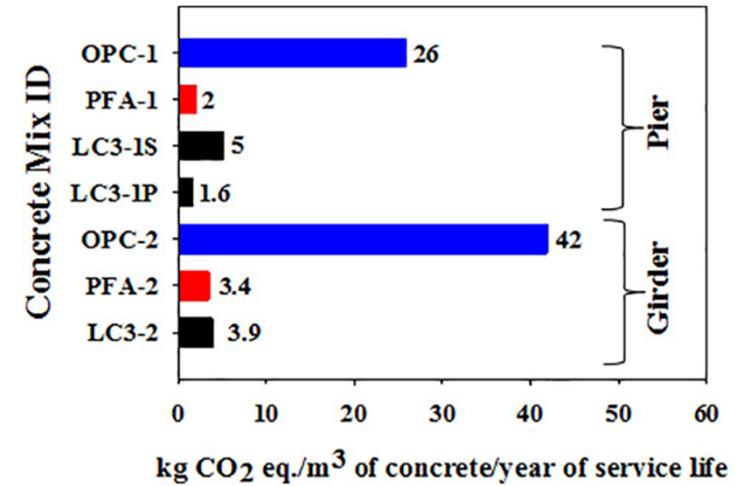
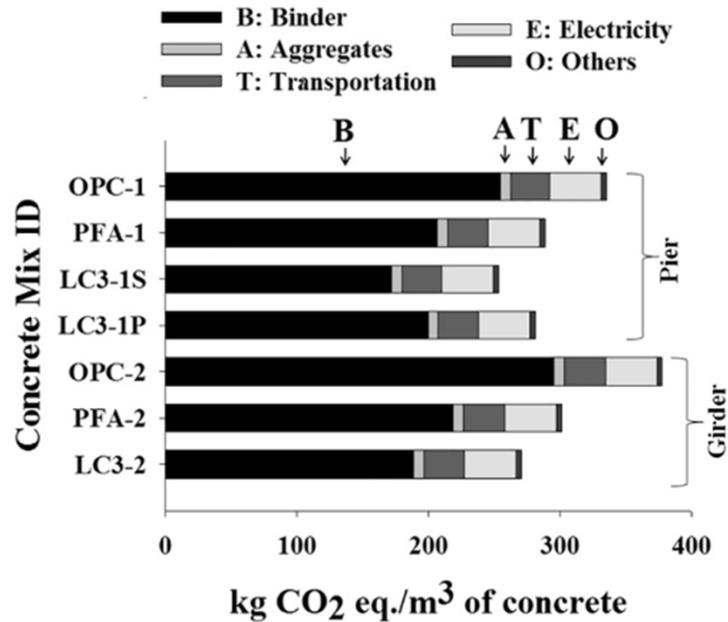
Source : Materials **2023**, 16, 2458
 Material-Level Opportunities
 Mariana Fonseca and Ana Mafalda Matos
<https://doi.org/10.3390/ma16062458>

Au niveau Mondial, en faveur du limestone calcined clay cements (LC³)



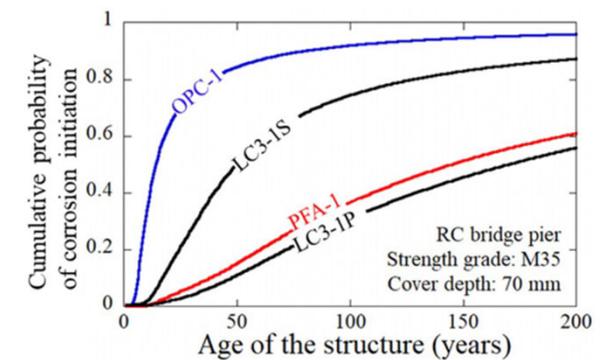
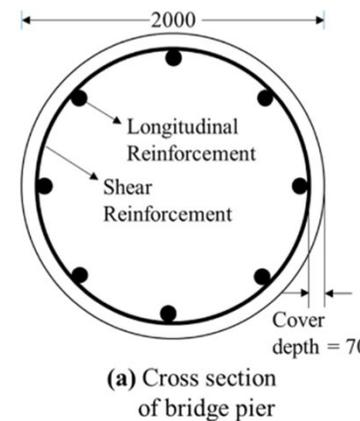
Source : Cement and Concrete Research 114 **2018**, 49-56
 Calcined clay limestone cements (LC³)
 Karen Scrivener Et al.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>

Publication sur le ciment LC3³



OPC (ordinary Portland cement)
 OPC + PFA (pulverised fuel ash)
 Limestone-calcined clay cement (LC3)

Source : Cement and Concrete Research 118, 2019
 Service life and life cycle assessment of reinforced concrete systems with limestone calcined clay cement (LC3)
 Radhakrishna G. Pillai Et al.

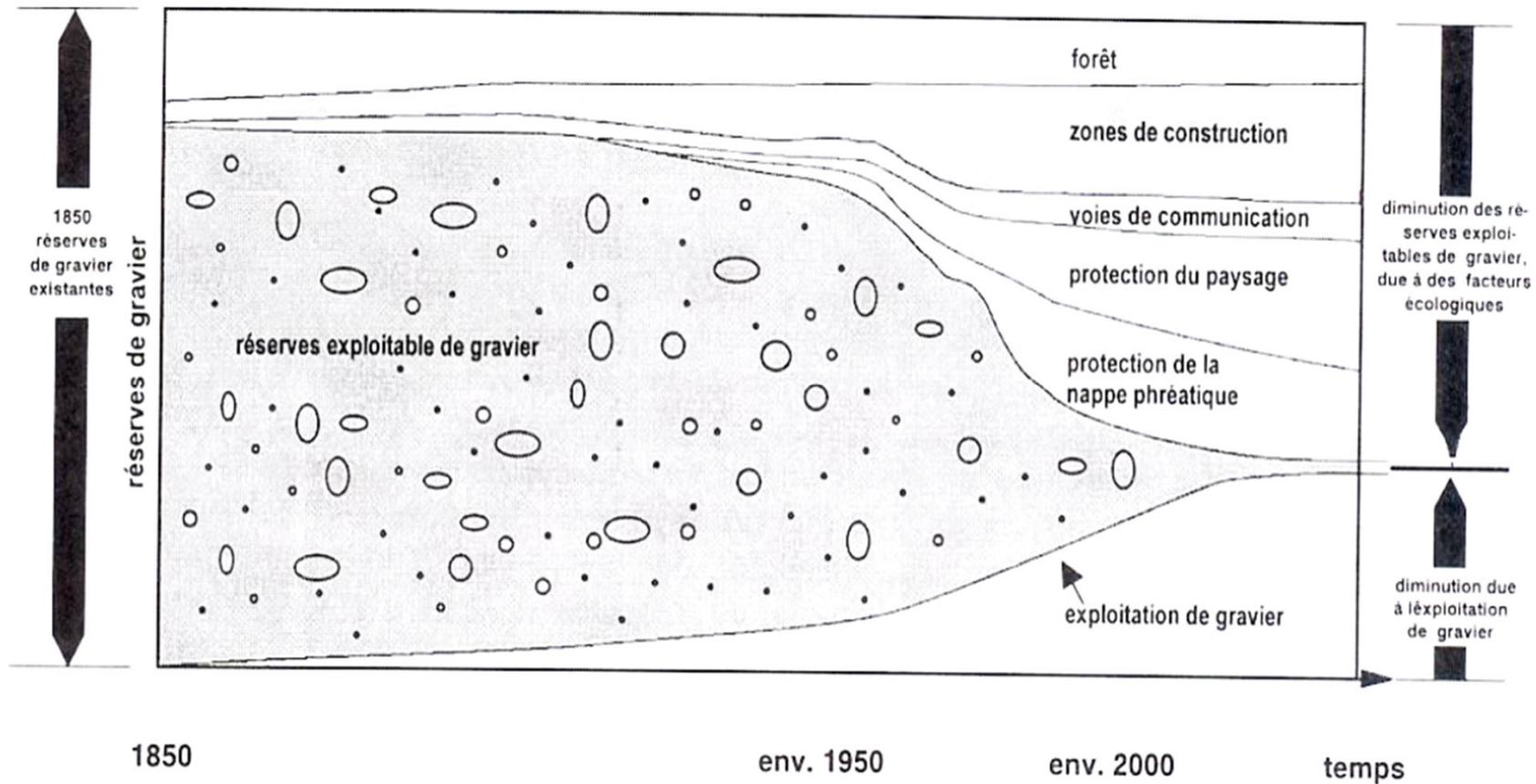


«Incorporer» du CO₂ dans le béton

- Captage du CO₂
- Granulats recyclés issus du béton de démolition
- Directement dans le béton frais
- Cure, dans chambre de CO₂, d'éléments de préfabrication avec des ciments spéciaux
- ...

Ressources : Approvisionnement en gravier

Contexte Genevois



**Epuisement
rapide des
ressources !**

Source : GESDEC

Recyclage et réemploi

Béton avec granulats recyclés (SIA 2030:2021)



Photo : D.Clément

« Ruvido » Granulats de scories de four électrique de l'aciérie électrique Stahl Gerlafingen



Source : infociments.fr

Bientôt des bâtiments en béton biosourcés ? Juillet 2019

Granulats non-minéraux : biosourcé

Blocs sciés d'éléments
existants en béton



Source: Tracé 12-10-2021

Urban-mining : Les mâchefers

Laboratoire d'Essais des Matériaux et des Structures (LEMS)

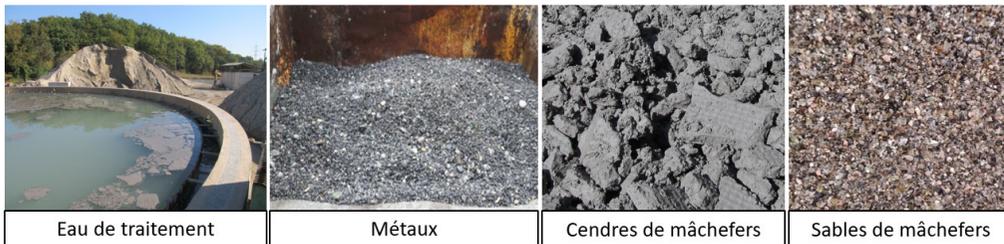
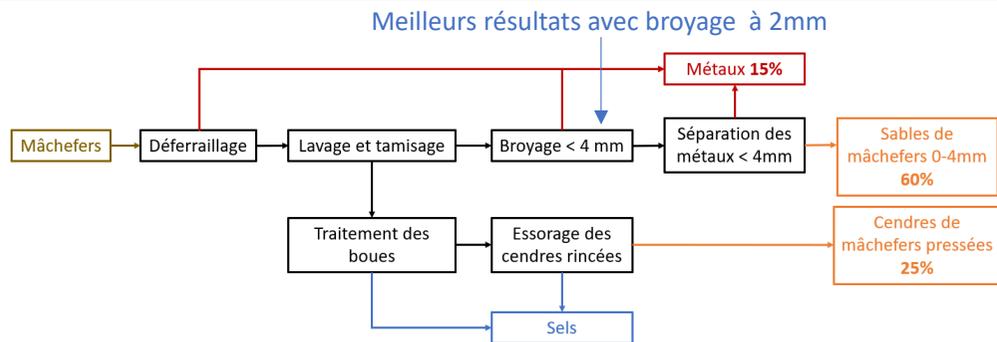


Schéma et photos : Australp

Des bétons avec sables de mâchefers sont déjà utilisés dans plusieurs pays d'Europe.

Des industriels recherchent des solutions de traitements pour les mâchefers suisses.

Actuellement développement de formulation et caractérisation de bétons avec sables de mâchefers à (LEMS-HEPIA)

Objectifs :

- Atteindre les exigences nécessaires pour une utilisation dans certains bétons en Suisse
- Valoriser de 50% des mâchefers du canton de GE

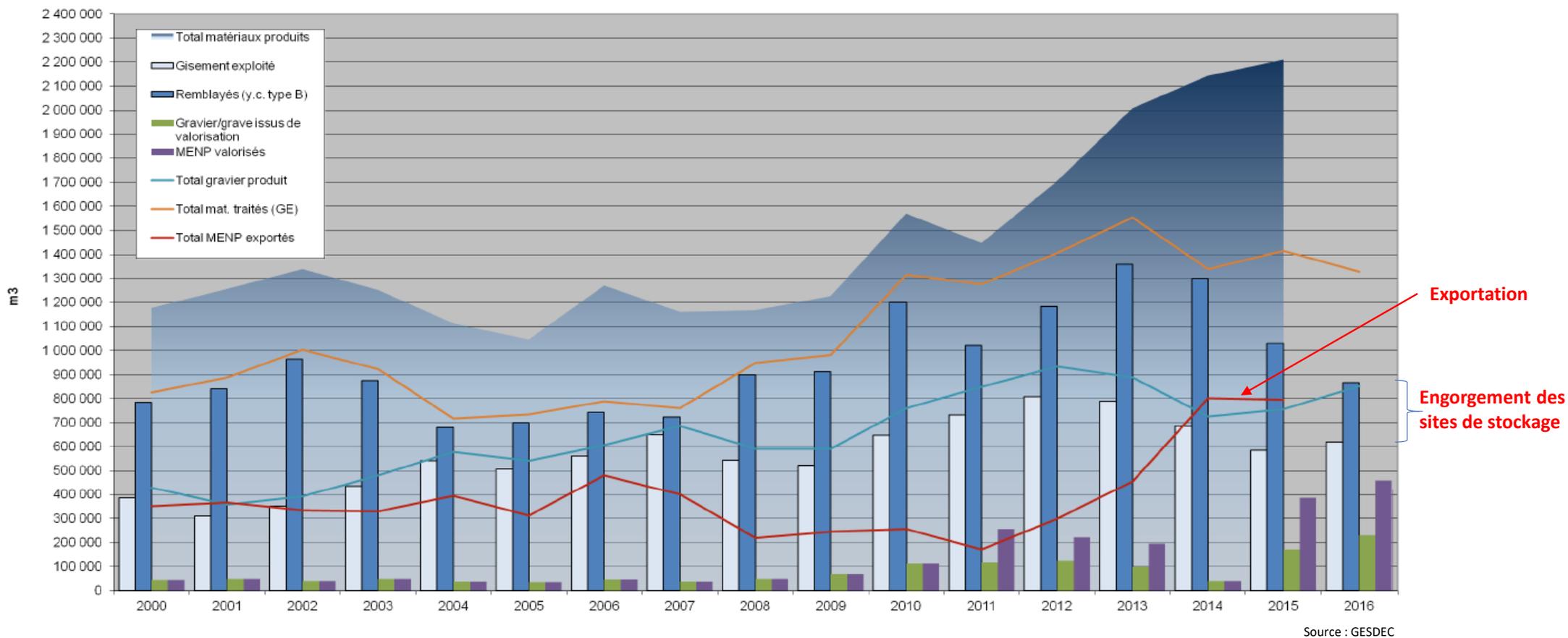
0.4 million de tonnes de sables 0-2mm de mâchefers suisses pour le béton ?

Environ 4 millions de tonnes de déchets combustibles incinérés dans les UIOM en Suisse

Source : opendata.swiss/fr

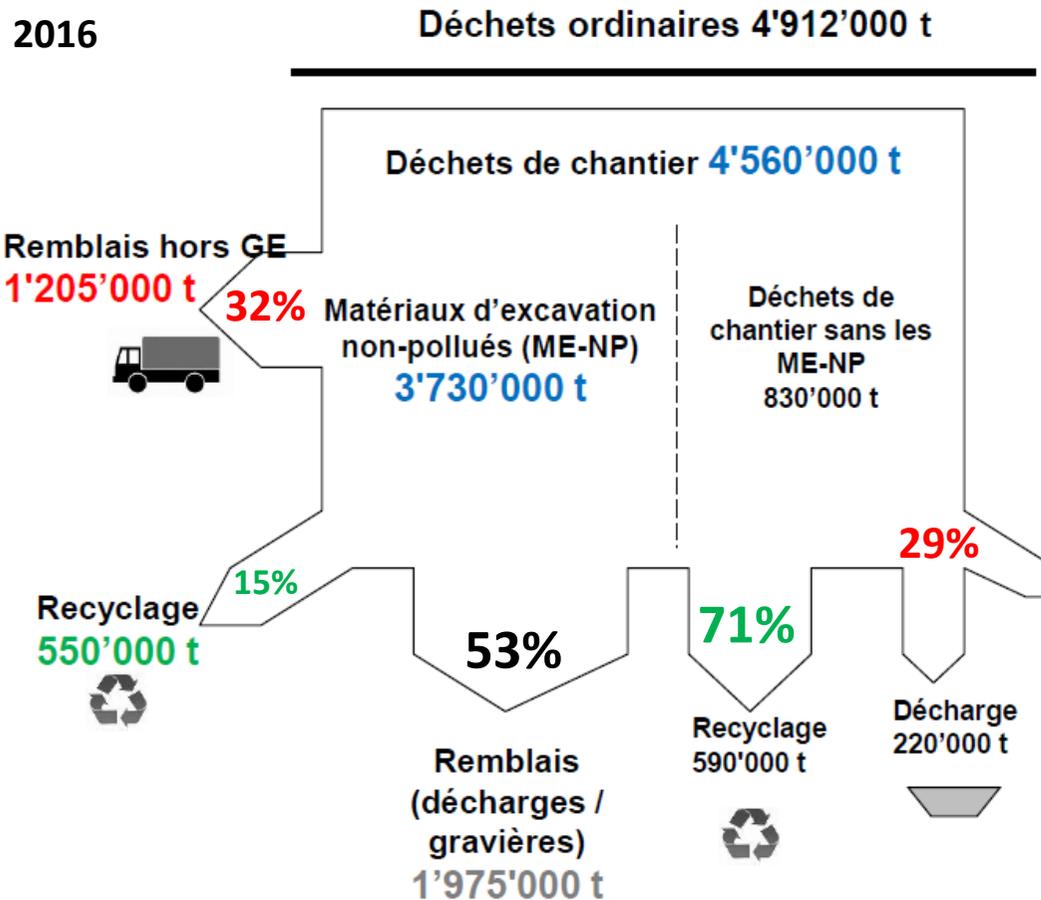
Gravier et matériau d'excavation non-pollué

contexte Genevois



Gravier et matériau d'excavation non-pollué

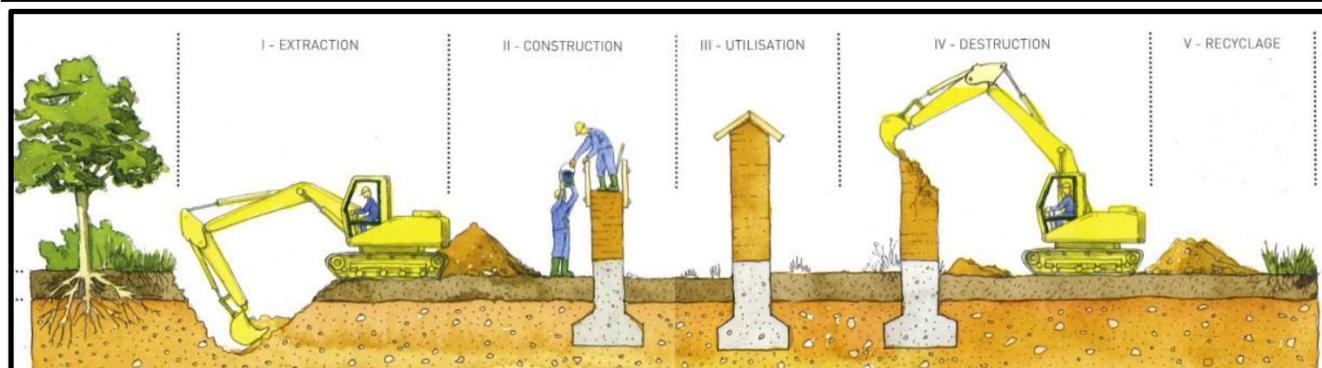
contexte Genevois



Source : GESDEC

Matériau d'excavation non-pollué

Exemple à Genève



Source : TFE Jehanne Palus 2015 – Anger & Fontaine 2009

Photos : Tracé 22/2019



Photo : A.Bennani

Murs porteurs intérieurs d'un restaurant scolaire dans le parc Geisendorf, Genève – TerraBloc– 2018

MO : Ville de GE ; Arch. : D.Reffo

Ing. civils : Ratio Bois, Studio Guscio et Normal Office Sarl

- Murs porteurs intérieurs
- 110 m³ de matériau en place → 22'000 briques de 30x14x9 cm
- Production sur place : 800 à 1000 briques / jours – 4 mois de séchage
- Caractérisation d'environ 300 briques au laboratoire LEMS - HEPIA
- Dalle mixte :
béton armé coulé sur place 120mm
sur panneau sapin 3plis 27mm
sur solives BLC épicéa GL24h
140xH320mm e=500mm



Photos : Tracé 22/2019

Matériau d'excavation non-pollué

Laboratoire d'Essais des Matériaux et des Structures (LEMS)



Photos : A.Bennani



Réaliser, pour la première fois, un bâtiment de 5 étages dont les murs porteurs seraient en terre crue
Produits de l'entreprise TerraBloc

Matériau d'excavation non-pollué

Laboratoire d'Essais des Matériaux et des Structures (LEMS)



Photo : F.Fazio

Mur à base de «béton de terre» contient déblais d'excavation terreux recyclés localement. Il peut être mis en œuvre de manière conventionnelle, par exemple par coulage dans des coffrages.

Autres produits :

- Briques d'argile extrudées
- cloison acoustique en blocs de terre compressée
- ...

Le pisé est une méthode de construction très ancienne, qui connaît aujourd'hui un regain d'intérêt. Elle est basée sur l'utilisation de terre crue compactée couche après couche entre les banches de coffrage.



Photo : D.Clément

Clément Denis

Professeur HES associé, Responsable du groupe **Matériaux et structures (MxS)**

Bennani Abdelkrim

Professeur HES associé, Responsable du laboratoire **LEMS**

Dupraz Pierre-André

Professeur HES associé, Responsable de la filière Génie civil

Fazio Florian

Collaborateur scientifique

Schaller Alexandre

Technicien



Tosolini Paola

Professeure HES associée, Responsable de groupe **Matière, Architecture, Durabilité, Espace (MADE)**

Lima Ricardo

Professeur HES associé, groupe **Bâtiments et énergie**